農業工程學報　第 58 卷第 4 期
中華民國 101 年 12 月出版

Journal of Taiwan Agricultural Engineering
Vol. 58, No. 4, December 2012

石門水庫水庫排砂操作影響鳶山堰取水之研究

The Impacts of Water Withdraw at Yuanshanyan During Sediment Venting in Shihmen Reservoir

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士生
李 豐 佐
Fong-Zuo Lee

國立臺灣大學
水工試驗所研究員
暨生物環境系統工程學系
兼任教授
賴 進 松*
Jihn-Sung Lai

財團法人國家實驗研究院
台灣颱風洪水研究中心
副研究員
郭 文 達
Wen-Dar Guo

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士生
黃 振 家
Cheng-Chia Huang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授
張 斐 章
Fi-John Chang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授
譚 義 績
Yih-Chi Tan

摘　　要

近年來石門水庫受到極端氣候影響，使得石門水庫原水濁度超過自來水可處理之程度，同時入庫流量所帶入之大量泥砂也造成水庫淤積嚴重及水庫庫容急遽減少之情況，因此利用颱風時期之洪水適時排放入庫泥砂進入下游，且不影響下游取水工取水及水庫蓄滿之原則相形變的刻不容緩。本研究之主要目的係利用經濟部水利署水質觀測站之觀測數據與石門水庫各出水工之泥砂濃度觀測值，進行二維水理與污染物傳輸之模擬分析，建立石門水庫排砂操作及穩定鳶山堰取水之操作策略。由水質觀測站在颱風事件之迴歸關係得知，石門水庫後池堰尖峰濁度到達鳶山堰的時間，約爲後池堰泥砂濁度之 0.001 倍；而鳶山堰之泥砂濁度約爲後池堰泥砂濁度之 0.89 倍；此外，經由模擬分析結果顯示，石門水庫出流量造成鳶山堰之泥砂濁度折減比例介於 0.99 倍至 0.89 倍之間。本研究亦探討石門水庫排洪隧道及溢洪道對於降低後池堰泥砂濁度之成效，由分析結果顯示，當排洪隧道額外增排流量達到 2600 m^3/s

*通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所研究員暨生物環境系統工程學系兼任教授，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號，jslai525@ntu.edu.tw

時(此爲假設值)，額外增加出流量以降低後池堰泥砂濁度效果已跟原本操作之後池堰泥砂濁度差異不大，且將排洪隧道之增加排放量與泥砂量關係式，應用於海棠颱風及韋帕颱風穩定鳶山堰供水操作時，可將鳶山堰之泥砂濁度達到自來水處理標準6000 NTU 以下之成效。

關鍵詞：濁度、觀測值，數值模式，操作策略。

ABSTRACT

In recent years, the climate change leads to high inflow discharge with high turbid sediment concentration from the watershed of Shihmen reservoir. Therefore, the water quality of Shihmenreservoir exceeds 6000 NTU that water treatmentplant can deal with. At the same time, a mount of sediment would deposit in reservoir bottom and lead to serious sedimentation problem of losing storage. As a result, using flood discharge to flushing sediment during Typhoon or rain fall durationis important. On the other hand, maintaining the stability of water supply and keeping more water resources are also important at the same time. This study adopts the data of water quality observation station from Water Resources Agency, MOEA and field observation data form outlet structures of Shihmen reservoir combining 2D numerical model to establish the operational strategies of flushing sediment and maintaining water supply. Based on regression relation of water turbidity between Afterbay and YuanShan weir and duration time from Afterbay to YuanShan weir, the water turbidity of YuanShan weir is about 0.89 times and propagation time is about 0.001 times of the water turbidity of Afterbay, respectively. According to the simulation results, the water turbidity of YuanShan weir is about 0.99 to 0.89 times of the discharge of Afterbay. This study also focuses on the turbid influence in Afterbayby tunnel spillway and spillway. Based on the analysis results, when the extra discharge reaches 2600 m^3/s (assumed), the influence of reducing water turbidity in Afterbay by tunnel spillway is almost the same to normal operation. When using the extra discharge of tunnel spillway to reduce water turbidity in Afterbay of Typhoon Haitang and Typhoon Wipha, the water turbidity of YuanShan weir can reduce water turbidity lower than 6000 NTU that water treatment plant can deal with.

Keywords: Water turbidity, Observation data, Numerical model, Strategies.

一、前　言

一般而言，水庫防淤技術可分爲機械清淤與水力清淤(經濟部水利署，2010；經濟部水資源局，2003)。目前國內水庫多採用機械清淤之方式來浚渫沉積於庫區內的淤砂，而主要採用機械清淤之水庫目前計有白河水庫、大埔水庫、明德水庫、德元埤水庫及石岡壩等五座。此外，台灣水庫多依傳統「蓄渾排清」之觀念規劃設計，即主要洩水結構爲頂部排洪之溢洪道或排洪隧道，並未考慮水力清淤之操作及營運方式，故水力清淤之經驗並不豐富且成效有限。濁水溪之武界壩、大甲溪之天輪壩、立霧溪之溪畔壩及尖山埤水庫，雖可藉由溢洪閘門或排砂閘門之開啓達空庫排砂(empty and flushing)之功效，但此排砂成效僅能避免取水口之淤積，僅達到恢復局部性水庫庫

表 1　國外水庫排砂操作方式

水庫名稱	排砂方式	水庫名稱	排砂方式	水庫名稱	排砂方式
芒阿豪水庫 (紐西蘭，建於 1924)	空庫排砂	水槽子水庫 (大陸，建於 1958)	水力排砂	南秦水庫 (大陸，建於 1974)	異重流排砂 空庫排砂
根西水庫 (美國，建於 1927)	洩降排砂	黑松林水庫 (大陸，建於 1959)	空庫排砂	伊切里水庫 (印度，建於 1975)	洩降排砂
澤莫阿夫查爾水庫 (前蘇聯，建於 1927)	洩降排砂	三門峽水庫 (大陸，建於 1960)	蓄清排渾 (空庫排砂) 異重流排砂	拜拉水庫 (印度，建於 1981)	利用導流隧道 進行水力排砂
鬧德海水庫 (大陸，建於 1942)	空庫排砂	塞菲德路德水庫 (伊朗，建於 1962)	空庫排砂	出平水庫與宇奈月水庫 (日本，分別建於 1985、2001)	空庫排砂
格明德水庫 (奧地利，建於 1945)	底孔排砂	橫山水庫 (大陸，建於 1966)	空庫排砂	美和水庫 (日本,1959)	繞道排砂
帕拉涅德拉水庫 (瑞士，建於 1952)	水力浚渫 機械清淤	格比德姆水庫 (瑞士，建於 1968)	排砂隧洞排砂	旭水庫 (日本,1978)	繞道排砂
官廳水庫 (大陸，建於 1953)	洩降排砂 異重流排砂	聖多明各水庫 (委內瑞拉，建於 1974)	洩降排砂 機械清淤	高山 水庫 (日本，1969)	機械清淤土砂 還原到下游河道； 繞道排砂；水力排砂

容的功能。尖山埤水庫採空庫排砂之方式清淤，自民國 56 年至今已近三十多年之歷史，至民國 74 年爲止已排除約 1,000,000 立方公尺之淤砂。阿公店水庫爲改善「蓄渾排清」的操作方式，於民國 87 年起開始辦理水庫更新改善工程之相關計畫，將原豎井溢洪管(管頂標高 34.5 公尺)敲除，改建成管頂標高爲 27 公尺(該處底床高程約 26 公尺)，並預計在汛期時不蓄水，以實施空庫防淤策略，期望減緩水庫淤積的速率，進而延長水庫之壽命。

根據本研究所收集整理之國外水庫主要排砂操作方式可知(表 1) (賴，2008；Chien and Wan, 1999; Fan and Morris, 2009; Sumi *et al*., 2009; Sumi and Kantoush, 2011)，預達到有效之水庫排砂效果，大部分之排砂操作皆爲空庫排砂、洩降排砂或是繞道排砂等方式；然而，台灣主要水庫爲了確保乾旱時期的水資源，無法在汛期充分利用空庫排砂及洩降排砂的方式來排除水庫泥砂。所以，近年來台灣逐漸朝向利用異重流排砂或是繞道排砂的方式(經濟部水利署水利規劃試驗所，2008)，希望能減緩進入水庫之泥砂量，並利用颱風豪雨時利用現有底孔出水工排除異重流，或是改建現有發電取水隧道爲排砂隧道，來增加排放異重流的效果。目前進行規畫中之水庫包含石門水庫、霧社水庫以及曾文水庫，但目前之繞道排砂皆處於規畫與研究階段。目前水庫排砂操作主要利用現有之發電隧道與永久河道放水口進行高濃度渾水之排放，高濃度渾水排放到下游後，常常造成下游原水濁度太高而導致自來水廠無法處理，或是直接影響農業用水(Tan *et al*., 2011)，譬如 93 年石門水庫因爲艾利颱風高濁度水，使得自來水廠無法將鳶山堰取水後之原水處理成可用之自來水，而造成桃園地區長達 16 天缺水問題最爲嚴重(經濟部水利署北區水資源局，2009)。石門水庫的後池與鳶山堰取水(經濟部水利署北區水資源局，2007；2008；2009)。因此，如何利用現有溢洪道或是排洪隧道排放適量之清水，以減低底孔放水工所造成的下游原水濁度太高問題實屬重要。

本研究選取石門水庫爲主要研究對象，探討排洪隧道操作對於減低鳶山堰取水泥砂濃度之影響，並且利用數值模式與歷史泥砂濃度觀測數據，建立後池堰與鳶山堰之泥砂濃度關係，作爲排洪隧道調節下游原水濁度之主要參考依據。

二、石門水庫簡介與供水排砂現況

石門水庫位於大漢溪中游之石門峽谷，水庫流域面積 763.4 平方公里，爲一多目標水庫。

水庫滿水位 245 公尺，設計最高洪水位 251 公尺，總蓄水量 309,120,000 立方公尺，水庫工程於民國 53 年 6 月竣工並開始蓄水營運，以灌溉、發電、公共給水、防洪兼觀光爲水庫建設目標。石門水庫之主要供水標的原爲農業用水，惟近年來桃園地區社會經濟發展迅速，水庫供水標的演變爲給水與灌溉並重，水庫年運用次數高達 4~5 次始能滿足各標的用水需求，如何提升各標的滿足度與降低失敗的風險是一重要的工作。近年來由於極端降雨事件之颱風暴雨侵襲及其他自然或人爲因素之影響，造成水庫集水區坡地沖刷與崩塌，使得早期水庫上游建築攔砂壩減緩水庫淤積問題，已不符需求且目前攔砂壩皆已大致淤滿，再加上民國 96 年韋帕颱洪導致巴陵壩損毀，使得水庫入流量夾帶大量泥砂進入水庫而造成水庫嚴重淤積，凸顯水庫原水高濁度與淤積問題。

換言之，現今水庫面臨問題係洪水逕流挾帶大量泥砂與流木進入庫區，其中粗顆粒泥砂在水庫上游三角洲落淤篩選，細顆粒泥砂形成高濃度渾水進入水庫，並且常以底層異重流方式在庫底往壩祉運移，且當異重流渾水來不及排放時，逐漸累積形成渾水水庫，而水庫上層清水則因爲溢洪排出而造成水庫「蓄渾排清」。此外，由於入庫渾水量置換數倍之水庫原蓄之清水量，造成水庫充滿高濁度渾水且渾水交界面沉降緩慢，且渾水濁度遠超過淨水場處理能力，導致淨水場無法供應民生與工業用水。因此，如何導引排放上游高濃度渾水進入下游河道，以及如何縮短渾水滯庫時間，已成爲現今水庫操作重點。

由於研擬水庫進行水力排砂期間，必須兼顧水庫蓄水與穩定供水之操作策略，作爲水庫運用要點及水門操作規定調整之參考。因此利用後池堰之出流量與出流濁度推估鳶山堰之濁度爲一重要課題。根據經濟部水利署北區水資源局 98 年修訂之石門水庫原水濁度異常緊急應變作業手冊顯示，在汛期時，當原水濁度達到 1,000 NTU 且水位達 232 公尺時，即啓動增設取水工進行抽水，輸出 1,400,000 CMD 的水量到桃園大圳及石門大圳，提供南桃園、北桃園部份地區、桃園水利會灌區及北桃園部分的供水需求，此外北桃園之剩餘部分用水量，則依靠鳶山堰與三峽堰之取水，以及大湳淨水廠與板新淨水廠之原水處理，提供北桃園之日常用水量。因此，爲了避免水庫在汛期進行排砂期間，所造成各取水工之原水濁度上升，以及準確掌握石門水庫原水濁度異常緊急應變作業程序，可透過現場原水濁度之觀測系統(經濟部水利署北區水資源局，2009)，準確掌握水庫入流與出流之原水濁度變化，另外根據水庫入流量以及當時庫容所存蓄之水量進行緊急應變作業程序，則可用以判斷可排放之水量與歷時，如此即可達到存蓄水量、排砂與正常供水之成效(經濟部水利署北區水資源局，2010)。

基於上述源由，使得利用「水力防淤」來達到減少淤積量、延長水庫壽命、穩定供水及提升民衆用水品質成爲現今水庫操作策略主流，以及現今石門水庫努力之目標，但石門水庫原設計並無水力防淤專用設施，因此在既有設施更新改善後，雖然能確保排放壩前高濃度渾水進入下游河道，以及如何縮短渾水滯庫時間，但仍會影響下游鳶山堰取水之功能，因此如何在中庄調整池設置完成前搭配現有出水工放流之較低泥砂濁度原水，使得鳶山堰泥砂濁度能達到自來水廠之處理能力爲本研究之重點。本研究擬針對 93 年艾利颱風過後，石門水庫防洪操作之出流量與出流泥砂濁度，搭配鳶山堰之觀測泥砂濁度，探討不同防洪操作下影響鳶山堰之泥砂濁度與影響時間之關連性，透過迴歸關係及數值計算獲得延遲時間、泥砂濁度與流量關係，並利用現有出水工實際操作之結果進行相關性驗證，以及應用實際案例進行石門水庫防洪排砂操作，達到鳶山堰取水可達自來水處理標準之泥砂濁度。

三、後池堰泥砂濁度對鳶山堰濁度之影響

本研究進行石門水庫排砂操作對鳶山堰濁度之影響，主要針對石門水庫後池堰之出流量及泥砂濁度與鳶山堰之泥砂濁度關係進行分析，因此本研究收集整理 93 年艾利颱風過後，經濟部水利署北區水資源局所觀測之石門水庫各出水

表 2　分析探討之颱風列表

年度	中文名稱	英文名稱	時間	強度
2009	莫拉克	MORAKOT	08/05~08/12	中度
2008	薔蜜	JANGMI	09/26~10/01	強烈
2008	辛樂克	SINLAKU	09/11~09/18	強烈
2008	鳳凰	FUNG-WONG	07/26~07/31	中度
2007	柯羅莎	KROSA	10/04~10/09	強烈
2007	韋帕	WIPHA	09/17~09/21	中度
2007	聖帕	SEPAT	08/16~08/21	強烈
2005	泰利	TALIM	08/30~09/03	強烈
2005	馬莎	MATSA	08/03~08/08	中度
2005	海棠	HAITANG	07/16~07/22	強烈

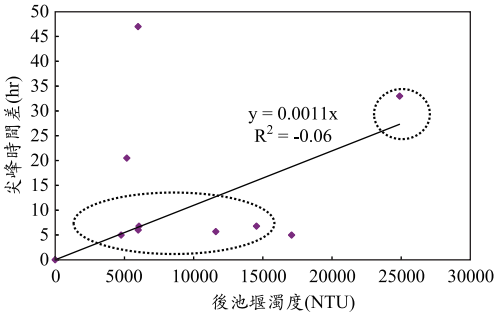

圖 1　後池濁度與尖峰時間差關係圖

工出流量及出流泥砂濁度，以及鳶山堰之水位與泥砂濁度數據，表 2 爲本研究收集整理之颱風事件列表，首先本研究針對石門水庫後池濁度發生尖峰時刻與鳶山堰泥砂濁度尖峰時刻進行相關性彙整，但過濾鳶山堰資料異常之颱風事件(鳳凰颱風)，圖 1 即爲整理之後池泥砂濁度與尖峰時間差之關係，由圖上可知進行線性迴歸時有三場颱風(聖帕颱風、馬莎颱風及泰利颱風)事件屬於離群值，相關性較低，因此本研究利用相關性較高之 6 場颱風事件進行分析可得圖 2 校正後之關連性，由圖上可知此 6 場颱風分別爲柯羅莎、海棠、辛樂克、薔蜜、韋帕及莫拉克颱風，相關性達 0.77，由上述之相關性分析可知後池堰之尖峰泥砂濁度到達鳶山堰之時間約爲後池泥砂濁度之 0.001 倍。本研究接續利用後池之出流量，探討各颱風之出流量尖峰時間與鳶山堰之泥砂濁度尖峰時間相關性，由圖 3 可知此相關性甚低因此

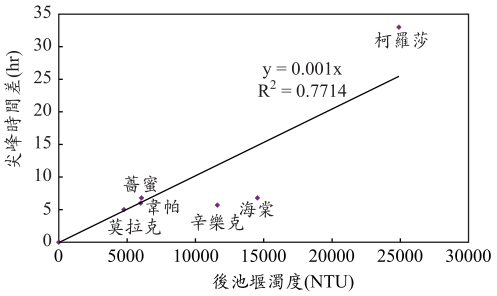

圖 2　後池濁度與相關性高之颱風事件尖峰時間差關係圖

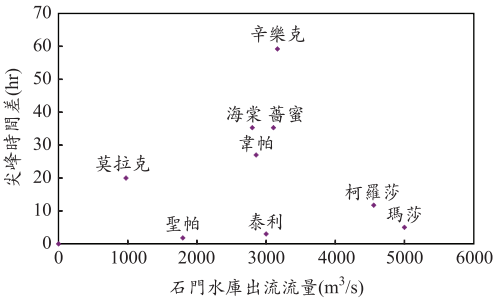

圖 3　全部颱風後池流量與尖峰時間差關係圖

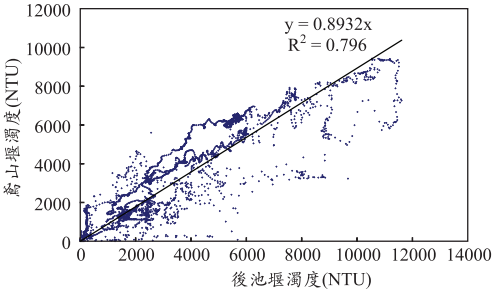

圖 4　後池濁度與鳶山堰濁度關係圖

無法進行相關性迴歸分析，由此可知利用石門水庫出流量無法推估鳶山堰尖峰泥砂濁度之時間，經由上述之分析結果可知鳶山堰之尖峰泥砂濁度值，可利用後池堰之泥砂濁度進行推估，圖 4 即爲利用後池堰之泥砂濁度與鳶山堰之泥砂濁度相關性進行迴歸，由迴歸關係式可知後池堰之泥砂濁度沿程遞減至鳶山堰時之比例約爲 0.89；依據此後池堰與鳶山堰之濁度關係，以及鳶山堰取水後可被自來水廠處理之濁度上限值，圖 4 關

係式即可做爲後續排洪隧道調節下游原水濁度之參考依據。

四、石門水庫下游河道泥砂運移機制

由於利用歷史觀測紀錄，迴歸後池堰之出流量推估鳶山堰之尖峰泥砂濁度相關性甚低，因此利用後池堰之出流量推估鳶山堰之泥砂濁度可信度甚低，因此本研究利用二維水理與污染物傳輸之數值模式，模擬水庫進行排砂操作時，後池堰下游河道之二維動床水理(含懸浮載)之流況與影響，並推求石門水庫出流量與鳶山堰泥砂濁度關係。

4.1 二維水理污染物傳輸模式

本研究所採用的二維水理模式係在有限體積法(finite volume method，簡稱 FVM)之數值離散架構下，配合高解析震波捕捉算則，計算不連續解之數值通量估算，可防止數值非物理性的振盪發生。茲將模式理論說明如下：

爲求解淺水中污染物傳輸之水理，結合二維淺水波方程式與污染物傳輸方程式，並寫成以下之向量守恆型式(Petti 與 Bosa, 2007)：

$$\frac{\partial \mathrm{Q}}{\partial t}+\frac{\partial \mathrm{F_{conv}}}{\partial x}+\frac{\partial \mathrm{G_{conv}}}{\partial y}=\frac{\partial \mathrm{F_{diff}}}{\partial x}+\frac{\partial \mathrm{G_{diff}}}{\partial y}+\mathrm{S} \quad \text{.... (1)}$$

其中，

$$\mathbf{Q}=\begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \\ hC \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_{\mathrm{conv}}=\begin{bmatrix} hu \\ hu^2+gh^2/2 \\ huv \\ huC \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_{\mathrm{conv}}=\begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2+gh^2/2 \\ hvC \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{\mathrm{diff}}=\begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{hT_{xx}}{\rho} \\ \dfrac{hT_{xy}}{\rho} \\ D_x\dfrac{\partial(hC)}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_{\mathrm{diff}}=\begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{hT_{xy}}{\rho} \\ \dfrac{hT_{yy}}{\rho} \\ D_y\dfrac{\partial(hC)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}=\begin{bmatrix} 0 \\ gh(s_{0x}-s_{fx}) \\ gh(s_{0y}-s_{fy}) \\ q_{se}-q_{sd} \end{bmatrix} \quad \text{..... (2)}$$

式中 Q 爲守恆物理向量；F_{conv}，G_{conv} 分別爲 x，y 方向之對流通量向量；F_{diff}，G_{diff} 分別爲 x，y 方向之擴散通量向量；S 爲源項，包含摩擦阻力與地面坡降；h 爲水深；u，v 分別爲 x，y 方向之水深平均流速；g 爲重力加速度；$s_{0x}=-\partial z_b/\partial x$，$s_{0y}=-\partial z_b/\partial y$ 與 s_{fx}，s_{fy} 分別爲沿 x、y 方向之底床坡度與摩擦坡度；z_b 爲底床高程；T_{xx}、T_{xy} 與 T_{yy} 爲水平紊流應力；ρ 爲流體密度；C 爲水深平均污染物(懸浮質泥砂)濁度；D_x 及 D_y 爲污染物擴散係數；q_{se} 與 q_{sd} 分別爲水流底部與河床交界面的泥砂捲增通量與沈滓沉降通量。模式係以曼寧阻力公式表示摩擦坡度：

$$s_{fx}=\frac{n_m^2 u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \quad s_{fy}=\frac{n_m^2 v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \quad \text{.... (3)}$$

式中，n_m 爲曼寧粗糙係數。另外，根據 Boussinesq 之渦流黏滯概念，可將紊流應力寫成分子黏滯項的形式，則 T_{xx}、T_{xy} 與 T_{yy} 表示如下：

$$T_{xx}=\frac{2\rho\mu_t}{h}\frac{\partial(hu)}{\partial x}$$
$$T_{xy}=\frac{\rho\mu_t}{h}\left[\frac{\partial(hu)}{\partial y}+\frac{\partial(hv)}{\partial x}\right] \quad \text{..... (4)}$$
$$T_{yy}=\frac{2\rho\mu_t}{h}\frac{\partial(hv)}{\partial y}$$

式中，$\mu_t = 1/6\kappa u_* h$ 爲紊流運動黏滯係數，κ 爲 von Karman's 係數(設定爲 0.4)，

$u_* = \sqrt{\tau_b / \rho}$ 爲剪力速度，τ_b 爲底床剪應力，可表示如下：

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad \tau_{bx} = \rho g h s_{fx} \quad \tau_{by} = \rho g h s_{fy} \quad ....(5)$$

此外，懸浮質泥砂的 x 與 y 方向之擴散係數，可與紊流運動黏滯係數有關，可表示爲 $D_x = D_y = \mu_t / \sigma_t$，$\sigma_t$ 爲經驗率定係數，需控制在 0.5 至 1.0 之間。

模式係採用 FVM 進行基本方程式之數值離散。對計算域內之任一控制體積分，並使用散度定理，將通量之面積分化爲沿其周邊界之線積分，可獲得：

$$\iint_\Omega \frac{\partial \mathrm{Q}}{\partial t} \mathrm{d}W + \int_{\partial\Omega} (\mathrm{F_{conv}}, \mathrm{G_{conv}}) \cdot \mathrm{n}\, \mathrm{d}l - \int_{\partial\Omega} (\mathrm{F_{diff}}, \mathrm{G_{diff}}) \cdot \mathrm{n}\, \mathrm{d}l = \iint_\Omega \mathrm{S}\, \mathrm{d}W \quad ..... (6)$$

式中，dW 爲控制體面積之微變量；∂Ω爲控制體Ω之周邊界；n 爲垂直於邊界向外爲正之單位向量；dl 爲控制體邊長之微變量。利用控制方程式之旋轉不變性，且假設物理向量 Q 之各變量爲控制體面積幾何中心點之各物理變量，則式(6)可進一步離散爲有限體積之基本運算方程式：

$$A \frac{\mathrm{dQ}}{\mathrm{d}t} + \sum_{m=1}^{M} \mathrm{T}(\theta)^{-1} \mathrm{F_{conv}}(\overline{\mathrm{Q}}) L^m - \sum_{m=1}^{M} \mathrm{T}(\theta)^{-1} \mathrm{F_{diff}}(\overline{\mathrm{Q}}) L^m = \widetilde{\mathrm{S}} \quad ..... (7)$$

其中，

$$\mathrm{F_{conv}}(\overline{\mathrm{Q}}) = \begin{bmatrix} hu_{\bar{x}} \\ hu_{\bar{x}}^2 + gh^2/2 \\ hu_{\bar{x}} v_{\bar{y}} \\ hu_{\bar{x}} C \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_{\mathrm{diff}}(\overline{\mathbf{Q}}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\mu_t \dfrac{\partial (hu_{\bar{x}})}{\partial \bar{x}} \\ \mu_t \dfrac{\partial (hu_{\bar{x}})}{\partial \bar{y}} + \mu_t \dfrac{\partial (hv_{\bar{y}})}{\partial \bar{x}} \\ D_x \dfrac{\partial (hC)}{\partial \bar{x}} \end{bmatrix} \quad ..... (8)$$

其中，$\mathrm{F_{conv}}(\overline{\mathrm{Q}})$ 與 $\mathrm{F_{diff}}(\overline{\mathrm{Q}})$ 分別爲對流與擴散的垂直邊界通量；$\overline{\mathrm{Q}} = \mathrm{T}(\theta)\mathrm{Q} = [h, hu_{\bar{x}}, hv_{\bar{y}}, hC]^{\mathrm{T}}$；A 爲控制體之面積；M 爲控制體之周邊界總數；$L^m$ 爲控制體第 m 邊之長度；θ 爲向量 n 與 x 軸之夾角；$u_{\bar{x}} = u\cos\theta + v\sin\theta$ 和 $v_{\bar{y}} = v\cos\theta - u\sin\theta$ 分別爲在 $\bar{x}$，$\bar{y}$ 方向之流速；$\mathrm{T}(\theta)$ 和 $\mathrm{T}(\theta)^{-1}$ 分別爲轉置矩陣與逆轉置矩陣。

接著使用逐分量 TVD 法進行對流通量之估算：

$$\hat{\mathrm{Q}}_{i,j} = \mathrm{Q}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{A_{i,j}} [\sum_{m=1}^{M} \mathrm{T}(\theta)^{-1} \mathrm{F}^{(1)}(\overline{\mathrm{Q}}) L^m]_{i,j} \quad \mathrm{Q}_{i,j}^{n+1} = \mathrm{Q}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{A_{i,j}} [\sum_{m=1}^{M} \mathrm{T}(\theta)^{-1} \mathrm{F}^{(2)}(\overline{\mathrm{Q}}) L^m]_{i,j} \quad ..... (9)$$

式中，i 和 j 分別表示 x，y 方向之離散化空間指標；$A_{i,j}$ 爲元素(i, j)之面積；$\mathrm{Q}_{i,j}^n$ 代表第 n 時刻元素(i, j)之物理向量；$\hat{\mathrm{Q}}_{i,j}$ 爲元素(i, j)之預測物理向量。$\mathrm{F}^{(1)}(\overline{\mathrm{Q}})$ 與 $\mathrm{F}^{(2)}(\overline{\mathrm{Q}})$ 分別爲一階及二階精度之法向數值通量。$\mathrm{F}^{(1)}(\overline{\mathrm{Q}})$ 可表示如下：

$$\mathrm{F}^{(1)}(\overline{\mathrm{Q}}) = \mathrm{F}^+(\overline{\mathrm{Q}}_{i,j}) + \mathrm{F}^-(\overline{\mathrm{Q}}_{i+1,j}) \quad ..... (10)$$

至於二階數值通量之計算可視爲一階逆風數值通量加上受限制之反擴散通量，表示爲：

$$\mathrm{F}^{(2)}(\overline{\mathrm{Q}}) = \mathrm{F}^{(1)}(\overline{\mathrm{Q}}) + \frac{1}{2}[\phi(r_{i+1/2,j}^+) w_{i+1/2,j}^+ - \phi(r_{i+1/2,j}^-) w_{i+1/2,j}^-] \quad ..... (11)$$

其中，

$$w^{+}_{i+1/2,j} = \mathrm{F}^{+}[\mathrm{T}(\theta)\hat{\mathrm{Q}}_{i+1,j}] - \mathrm{F}^{+}[\mathrm{T}(\theta)\mathrm{Q}^{n}_{i,j}] \quad w^{-}_{i+1/2,j} = \mathrm{F}^{-}[\mathrm{T}(\theta)\mathrm{Q}^{n}_{i+1,j}] - \mathrm{F}^{-}[\mathrm{T}(\theta)\hat{\mathrm{Q}}_{i,j}]$$

$$r^{+}_{i+1/2,j} = \frac{w^{+}_{i-1/2,j}}{w^{+}_{i+1/2,j}} \qquad r^{-}_{i+1/2,j} = \frac{w^{-}_{i+3/2,j}}{w^{-}_{i+1/2,j}} \qquad \phi(r) = \frac{r+|r|}{1+|r|} \qquad \text{..... (12)}$$

模式採用 van Leer 通量向量分裂，進行數值通量之估算。根據水流流況福祿數值，分裂通量向量。對於亞臨界流，$|F_r| \le 1$，通量向量分裂如下：

$$\mathrm{F}^{\pm} = \begin{bmatrix} \pm\frac{1}{2(1+\alpha)}\sqrt{g}h^{3/2}(\pm F_r+1)(\pm\alpha F_r+1) \\ \frac{1}{4}gh^{2}(\pm F_r+1)^{2}(\pm\frac{1}{2}F_r+1) \\ \pm\frac{1}{2(1+\alpha)}\sqrt{g}h^{3/2}(\pm F_r+1)(\pm\alpha F_r+1)v_t \\ \pm\frac{1}{2(1+\alpha)}\sqrt{g}h^{3/2}(\pm F_r+1)(\pm\alpha F_r+1)C \end{bmatrix} \text{..(13)}$$

式中，福祿數 $F_r = u_n / c$。對於超臨界流：$F_r > 1$，有 $\mathrm{F}^{+} = \mathrm{F}(\overline{\mathrm{Q}})$ 和 $\mathrm{F}^{-} = 0$；$F_r < -1$，有 $\mathrm{F}^{+} = 0$ 和 $\mathrm{F}^{-} = \mathrm{F}(\overline{\mathrm{Q}})$。式(13)中的引入參數 α，需給定爲 0.856，算則之數值通量於特徵值零點不會造成不連續可微，可滿足熵(entropy)條件，不會產生違反熵(entropy-violating)之解。在擴散數值通量之估算方面，使用 Jacobian 轉換方法，進行污染物濁度一階導數項的數值離散。

爲了使數值通量梯度與源項達到守恆，獲得正確的數值解(Leveque, 1998)，畫採用 Zhou 等(2001)所提出之水面坡降法，進行底床坡度源項處理：

$$\overline{\mathrm{Q}}^{\mathrm{L}}_{i+1/2,j} \begin{bmatrix} h^{\mathrm{L}}_{i+1/2.j} \\ h^{\mathrm{L}}_{i+1/2.j}(u_{\bar{x}})^{\mathrm{L}}_{i+1/2.j} \\ h^{\mathrm{L}}_{i+1/2.j}(v_{\bar{y}})^{\mathrm{L}}_{i+1/2.j} \\ h^{\mathrm{L}}_{i+1/2.j}C^{\mathrm{L}}_{i+1/2.j} \end{bmatrix} \text{.....(14)}$$

$$\overline{\mathrm{Q}}^{\mathrm{R}}_{i+1/2,j} \begin{bmatrix} h^{\mathrm{R}}_{i+1/2.j} \\ h^{\mathrm{R}}_{i+1/2.j}(u_{\bar{x}})^{\mathrm{R}}_{i+1/2.j} \\ h^{\mathrm{R}}_{i+1/2.j}(v_{\bar{y}})^{\mathrm{R}}_{i+1/2.j} \\ h^{\mathrm{R}}_{i+1/2.j}C^{\mathrm{R}}_{i+1/2.j} \end{bmatrix}$$

採用水位減去元素邊界面處的水底高程，即可得到界面左、右兩側之水深。接著，分別代入式(14)與式(9)，即可進行數值通量之估算。

爲確保算則獲得穩定的數值解，演算時距需要符合以下的限制：

$$\Delta t \le CFL \min(\Delta t_{\mathrm{conv}}, \Delta t_{\mathrm{diff}}) \text{ ..... (15)}$$

其中，

$$\Delta t_{\mathrm{conv}} = \frac{d_{i,j}}{\max(\sqrt{u^2+v^2}+\sqrt{gh})_{i,j}} \qquad \Delta t_{\mathrm{diff}} = \frac{d_{i,j}}{\max(D_x, D_y)_{i,j}} \text{ ..... (16)}$$

式中，$d_{i,j}$ 代表相鄰元素中心的距離。在數值邊界之處理方面，水流邊界可參考 Guo 等(2008)。在污染物傳輸問題方面，則使用 Toro (2001)提出的可穿透水流邊界條件。

另一方面，爲進行鳶山堰取水口附近之底床沖淤演變趨勢模擬，需考慮二維沈滓輸運連續方程式，以推算底床高程之沖淤量。根據石門水庫沉泥的粒徑分析可知，壩址前的淤砂多爲細顆粒沉滓，屬於凝聚性沉滓之懸浮載運移，故床形變化主要係由懸浮載運移所造成，可忽略底床載。因此，方程式可表示如下：

$$(1-\lambda)\frac{\partial z_b}{\partial t} = -(q_{se} - q_{sd}) \text{ ..... (17)}$$

其中，λ 爲沈滓孔隙率；z_b 爲底床高程；$(q_{se} - q_{sd})$ 爲淨懸浮載源。

在數值求解方面，採用 Euler 時間積分法，進行數值離散：

$$\frac{dz_b}{dt} = \frac{-1}{1-\lambda}(q_{se} - q_{sd}) \text{ ..... (18)}$$

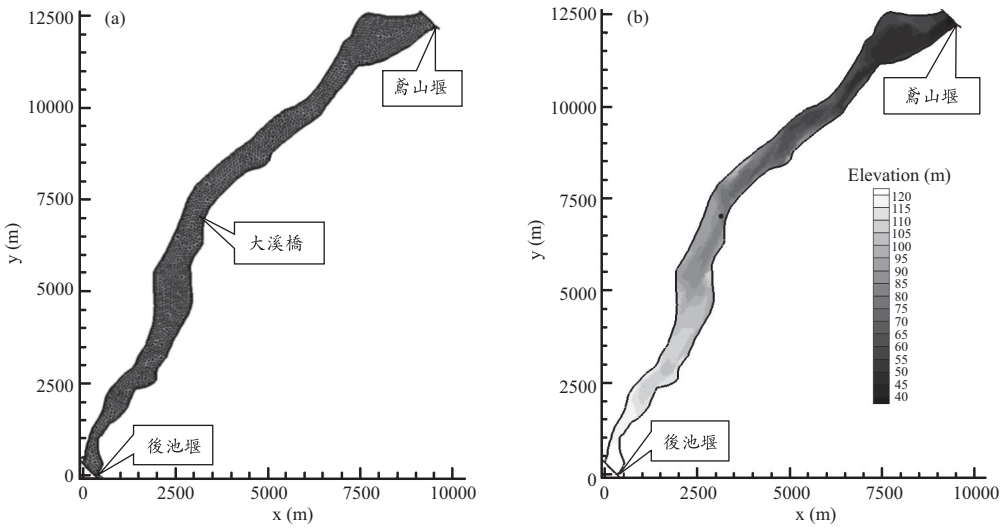

圖 5　河道泥砂濁度模擬之(a)演算網格及(b)地形等值圖

對於凝聚性沉滓而言，q_{sd} 可表示爲：

$$q_{sd} = Pw_f C \qquad (19)$$

式中，$P = 1 - \tau_b / \tau_{cd}$ 爲沉降機率，當 $\tau_b < \tau_{cd}$ 時，懸浮的沉滓都會落淤下來；τ_{cd} 爲臨界沉降剪應力；C 爲深度平均濃度；w_f 爲考慮絮結效應之沉滓沉降速度，可表示如下：

$$w_f = 250 d_m^{-1.8} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g d_m^2}{18\upsilon} \qquad (20)$$

其中，ρ_s 爲泥砂密度；d_m 爲泥砂顆粒平均粒徑；υ 爲水之運動黏滯性。

另外，對於凝聚性沉滓而言，q_{se} 可表示爲：

$$q_{se} = E\left(\frac{\tau_b}{\tau_{ces}} - 1\right) \qquad (21)$$

其中，E 爲沖刷係數；τ_{ces} 爲臨界表層沖刷剪應力。

4.2 後池堰至鳶山堰之河道泥砂濁度模擬

本研究依據上述所建立之二維水理與污染物傳輸之數值模式，進行石門水庫後池堰至鳶山堰間之河道水理與懸浮值輸砂模擬，本研究以收集資料較爲完整之薔蜜颱風實測資料，檢定模擬區域之相關模式輸入參數，接著，再以校正後的參數，進行資料中後池堰泥砂濁度最高之科羅莎颱風模擬驗證，模擬時間則選定後池堰出流量尖峰時刻區間或是鳶山堰水位變動較爲劇烈之區間，以檢驗模式之模擬功能。

本研究根據 2006 年的河道範圍及地形資料，進行二維網格的生成，並利用 BOSS 公司商業軟體 SMS (Surface Water Modeling System)之編置網格功能，可獲得非結構性之計算網格，其網格總數爲 3610 個，如圖 5 所示；圖中並標示出上游入流邊界位置(石門後池堰)、大溪橋斷面位置(泥砂濁度採樣地點二度分帶座標爲 278610，2753074，靠近距右岸的第二個橋墩處)以及下游出流邊界位置(鳶山堰)。

本研究首先採用 σ_t 率定係數爲 0.65，沖刷係數爲 $E = 3\times10^{-6}$ kgm^{-2} s^{-1}，以進行薔蜜颱風事件之檢定，薔蜜颱風量測的沈滓中值粒徑爲 d_m = 8 × 10^{-6} m，模擬演算時間爲 2008/9/29 的 13:00 至 2008/10/1 的 12:00，共模擬 48 小時，上游入流邊界給定變量流歷線及泥砂濁度歷線，下游出流邊界則給定水位歷線，下游濁度之邊界條件則設定爲自由出流，模擬邊界條件如圖 6 所示。在初始條件方面，於所有計算網格給定水位爲 130 m，初始水流流速爲零，初始泥砂濁度爲 0 NTU。穩定性參數 CFL (Courant Friedrichs Lewy)爲 0.7。模擬結果如圖 7 所示，其中圖 7(a)爲大溪

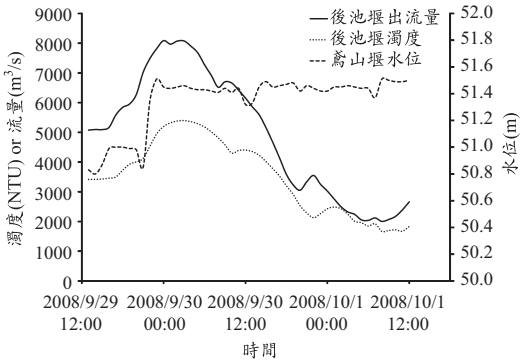

圖 6　薔蜜颱風邊界條件

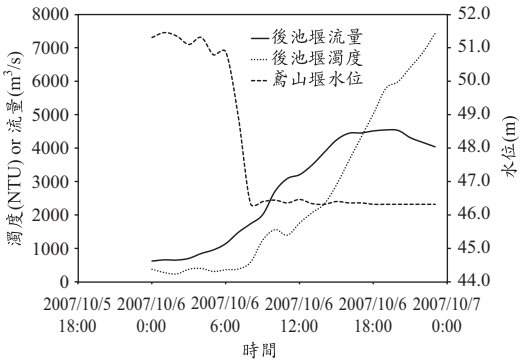

圖 8　科羅莎颱風邊界條件

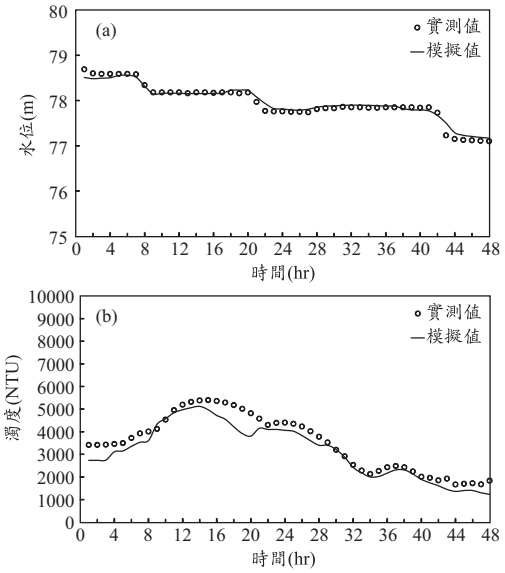

圖 7　薔蜜颱風事件模擬之大溪橋(a)水位歷線；(b)泥砂濁度模擬結果與實測值比較(檢定)

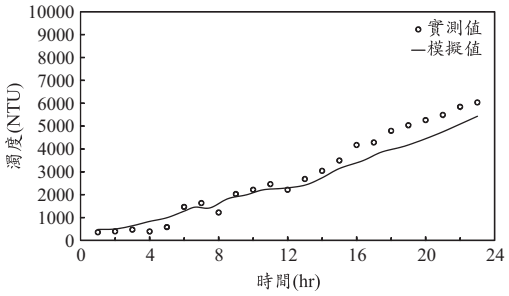

圖 9　科羅莎颱風事件模擬之大溪橋泥砂濁度歷線模擬結果與實測值比較(驗證)

橋水位歷線模擬結果與實測值之比較，模擬結果顯示與實測值相當吻合，圖 7(b)為大溪橋泥砂濁度歷線模擬結果與實測值之比較，顯示尖峰濁度之實測值(5396 NTU)與模擬值(5120 NTU)約相差 276 NUT；其誤差可能原因為，模式濁度值為水深平均化之結果，而實測值之量測方式可能並非多點平均，因此造成誤差。然而，模式仍可獲得與實測值略相吻合的趨勢變化。

接著，進行科羅莎颱風事件之模擬驗證。颱風量測的沈滓中值粒徑為 $d_m = 8\times10^{-6}$ m。模擬演算時間為 2007/10/6 的 00:00 至 2007/10/7 的 00:00，共模擬 24 小時。有關邊界條件的設定，上游入流邊界同樣給定變量流歷線及泥砂濁度歷線，下游出流邊界給定水位歷線，如圖 8 所示，下游濁度之邊界條件則同樣設定為自由出流。在初始條件方面，於所有計算網格給定水位為 130 m，初始水流流速為零，初始泥砂濁度為 0 NTU。穩定性參數 CFL (Courant Friedrichs Lewy)為 0.7。圖 9 為大溪橋泥砂濁度歷線模擬結果與實測值之比較，結果顯示，泥砂濁度之變化較無明顯的尖峰值出現，隨時間增長而泥砂濁度增加，且模式可合理模擬出與實測值相吻合的趨勢變化。

本研究接著利用檢定驗證完成之二維動床水理(含懸浮載)數值模式，進行數值試驗，以迴歸出水庫之出流量與出流濁度到達下游鳶山堰時之濁度參考值。數值試驗係固定上游後池堰出流濁度為 10000 NTU，進行 1000 m^3/s 至 15000 m^3/s

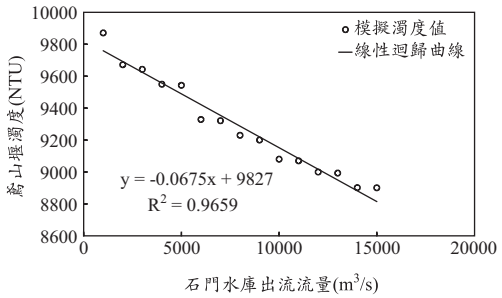

圖 10　石門水庫出流流量與鳶山堰濁度之線性關係分析

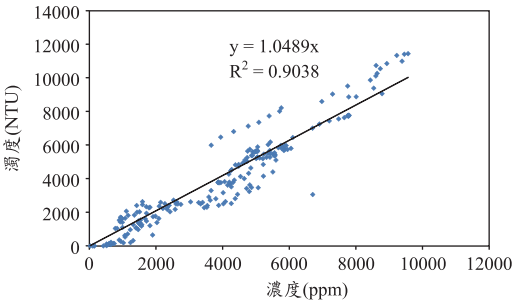

圖 11　石門水庫出流泥砂濃度與濁度之關係圖

(此爲假設值)流量之數值模擬(流量間距爲 1000 m^3/s，共 15 組試驗)，並將迴歸結果顯示於圖 10，圖 10 顯示受到地形與水流量大小之對流及擴散影響，使得出流濁度到達下游鳶山堰之濁度，隨流量增加而線性遞減，當後池堰出流量爲 1000 m^3/s 時鳶山堰濁度爲 9871 NTU；當後池堰出流量爲 15000 m^3/s (此爲假設值)時鳶山堰濁度爲 8901 NTU，由此可知後池堰出流量對於鳶山厭之濁度折減率介於 0.99 至 0.89 之間，其中 0.89 之折減率與圖 4 利用後池堰之濁度折減率相同，綜合言之，利用後池堰濁度折減 0.89 倍後可得鳶山堰濁度。

五、石門水庫排砂操作之策略研擬

本研究針對石門水庫各出水工有較完整量測泥砂濃度資料之辛樂克、鳳凰及薔蜜颱風，實際操作排砂策略於 93 年至 98 年颱風豪雨事件，並進行成效之檢核，以達到石門水庫出水工調配排放至後池之水量與砂量使得鳶山堰取水濁度小於 6,000 NTU (自來水廠可處理之原水濁度)之成果。但石門水庫各出水工之泥砂濃度量測值皆爲 ppm (mg/L)，因此必須先建立各出水工之泥砂濃度量測單位 ppm 與後池堰之泥砂濃度單位 NTU 之相關性，依據水利規劃試驗所(2008)「石門水庫水砂運移監測與異重流模式開發及應用研究」顯示濁度與濃度關係約爲 1 ppm = 1.35 NTU，但依據歷史量測事件(辛樂克、鳳凰及薔蜜颱風)之迴歸結果，1 ppm~1.0 NTU 如圖 11 所示)，又水庫各出水工之泥砂監測數值皆以泥砂濃

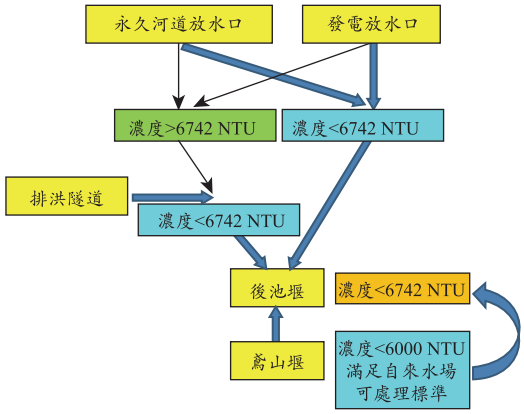

圖 12　石門水庫排砂操作策略研擬流程

度 ppm 爲量測結果，因此根據自來水廠之處理能力，鳶山堰取水濃度應小於 6,000 ppm 左右。所以，本研究之石門水庫排砂操作之策略研擬以濃度作說明如下。

根據上述之濁度與濃度換算結果，水庫排砂期間操作策略研擬即針對鳶山堰取水濃度應小於 6,000 ppm 進行擬定，換句話說，利用圖 4 之關係式可知後池堰濁度應小於 6742 ppm，才能滿足鳶山堰穩定供水之操作，整理之策略操作流程圖則如圖 12 所示。由圖 13 可知後池堰之泥砂濁度上升時間皆位於水庫出流歷線後半段，因此本研究主要針對出流量歷線後半段之各出水工流量與泥砂量，進行相關性迴歸，以求得出水工流量與砂量關係式，圖 14 即爲排洪隧道及溢洪道之出流量與出流泥砂量關係圖，由圖上可知排洪隧道之相關性較高，因此本研究針對排洪隧道之操作，進行排洪隧道操作更新前後對於後池堰

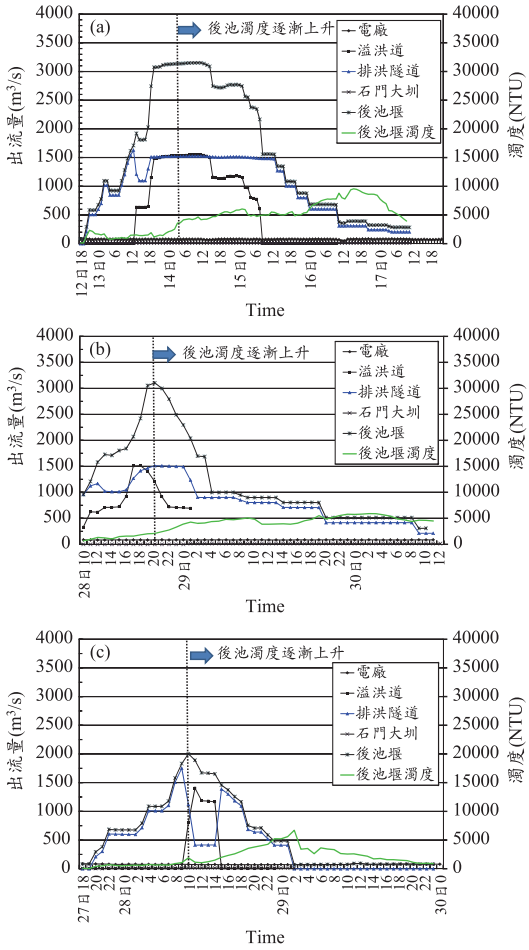

圖 13　出流濃度與流量歷線圖(a)辛樂克颱風；(b)薔蜜颱風；(c)鳳凰颱風

濁度之影響性分析，圖 15 即為利用排洪隧道操作規則探討更新操作前後對於後池堰濁度之影響，其中更新後之流量係針對排洪隧道在滿水位時閘門開啓與出流量之關係給定，換句話說，在原始操作下若排洪隧道出流量額外增加 200 m^3/s、275 m^3/s、350 m^3/s、440 m^3/s、520 m^3/s、610 m^3/s、720 m^3/s、830 m^3/s、950 m^3/s 及 1070 m^3/s 時之後池堰濁度變化，由圖上可知當排洪隧道流量額外增加至 2600 m^3/s (此為假設值)時，額外增加出流量之效果已跟原本操作之泥砂濁度差異不大，且歷史排洪隧道操作增排量皆小於 1000 m^3/s，因此，本研究主要針對排洪隧道額外增排 0 至 1070 m^3/s，進行排洪隧道更新操作前

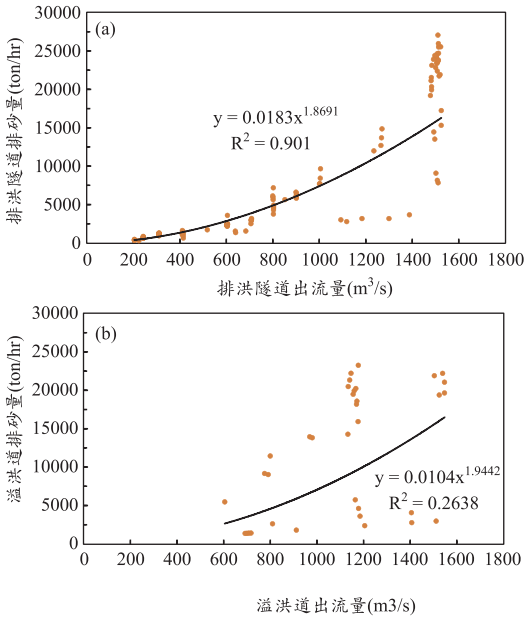

圖 14　出流量與出流泥砂量關係(a)排洪隧道；(b)溢洪道

後對於後池堰濁度之影響。由歷史資料顯示海棠颱風及韋帕颱風之後池堰濁度皆超過自來水廠之處理極限，因此本研究利用此兩場颱風進行鳶山堰穩定供水時石門水庫之排砂操作，圖 16 及圖 17 顯示海棠颱風在排洪隧道額外增排 440 m^3/s 時可使得後池堰濁度降低至 6742 NTU 以下，而韋帕颱風在排洪隧道額外增排 830 m^3/s 時可使得後池堰濁度降低至 6742 NTU 以下，經由上述之排砂操作即可滿足水庫排砂以及鳶山堰穩定供水之需求。

六、結論與建議

由歷史資料之迴歸關係可知，後池堰與鳶山堰之濁度關係較為良好，但是石門水庫之出流量則與鳶山堰之濁度關係有限，原因在於每一場颱風豪雨所帶入水庫之泥砂含量皆有不同，以及每場颱風豪雨之水文歷線皆有獨特性，且受到水庫水體之稀釋作用後，排放後池堰之泥砂濃度又受到防洪操作之影響，因此難以建立水庫排放流量與泥砂量之關係，進而影響到出流量與鳶山堰濁度關係之建立，但利用數值模式之演算，本研究

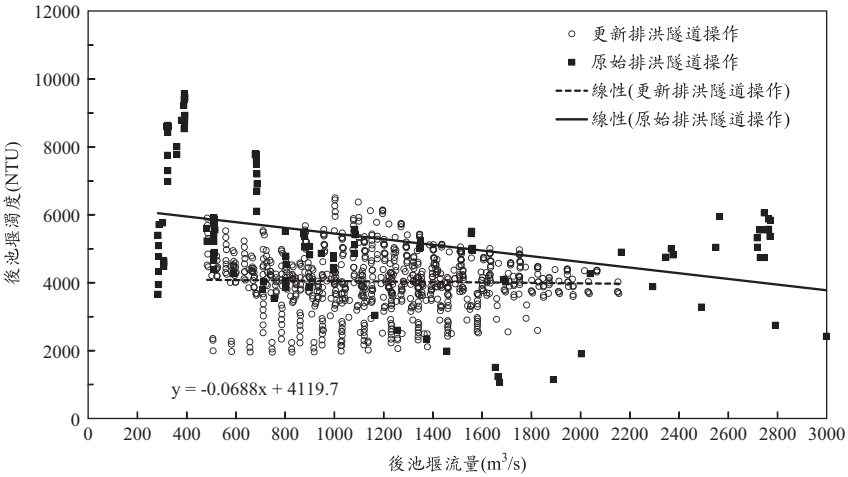

圖 15　排洪隊道放流量對折減後池堰濁度關係圖

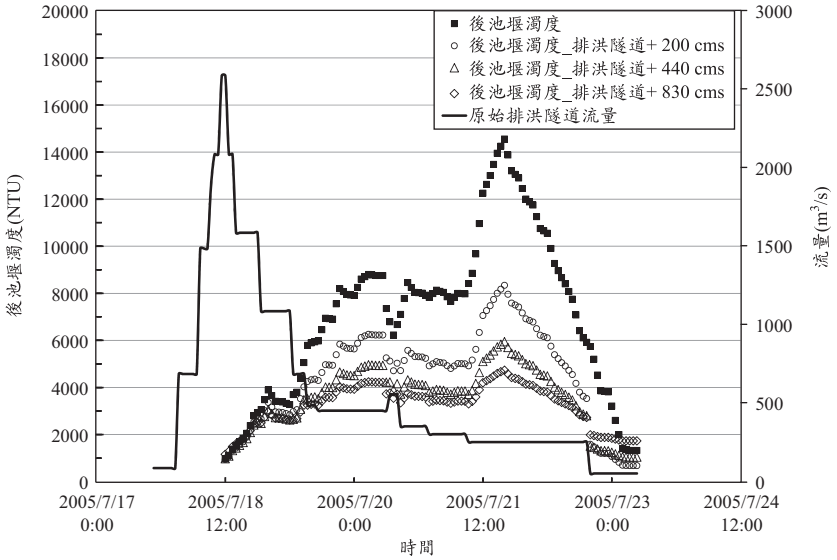

圖 16　海棠颱風排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖

仍可探討水庫定量放水後，後池堰到鳶山堰之泥砂濃度遞減律，以作爲利用出流量判斷鳶山堰泥砂濃度之參考值。

因此，綜合數值模擬之研究結果且由歷史資料所建立之迴歸關係，可得後池堰之濁度影響石門水庫尖峰濁度到達鳶山堰的時間，約爲後池堰泥砂濁度之 0.001 倍；而鳶山堰之泥砂濁度約爲後池堰泥砂濁度之 0.89 倍，換句話說，當鳶山堰滿足自來水處理極限 6000 NTU 時，後池堰允許之排放泥砂濁度爲 6742 NTU，此外，經由數值模式之模擬結果顯示，石門水庫出流量造成鳶山堰之泥砂濁度折減比例介於 0.99 倍~0.89 倍之間。本研究同時探討石門水庫排洪隧道及溢洪道對於降低後池堰泥砂濁度之成效，進行相關性分析，由迴歸結果可知排洪隧道之相關性最高，且石門水庫管理單位也經常使用排洪隧道降低後池堰泥砂濁度，由分析結果顯示當排洪隧道額外增排流量達到 2600 m^3/s (此爲假設值)時，額外增

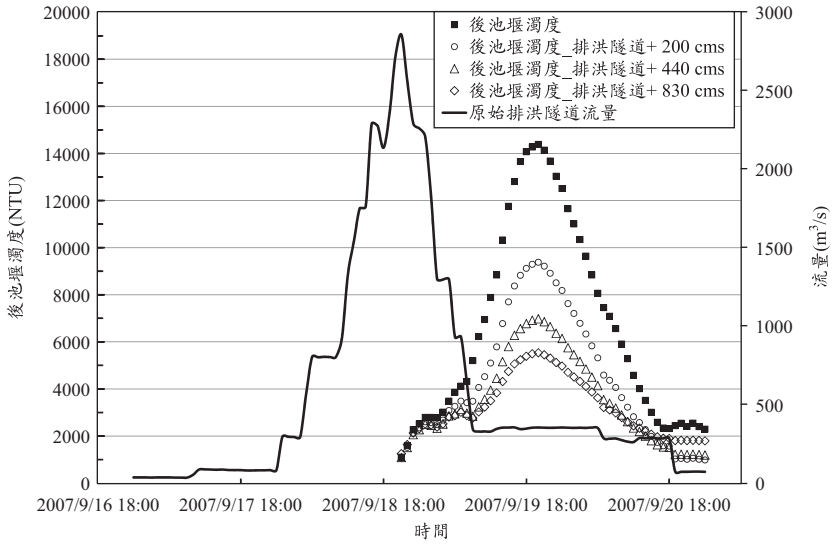

圖 17　韋帕颱風排洪隧道放流量對折減後池堰濁度關係圖

加出流量之效果已跟原本操作之泥砂濁度差異不大，且將其應用於海棠颱風及韋帕颱風穩定鳶山堰供水操作時，可將後池堰之泥砂濁度達到自來水處理標準之成效。

雖然本研究之初步成果可應用於穩定鳶山堰供水之操作，但所收集之歷史颱風事件僅 10 場，且其中資料異常與資料變異性仍大，難以提高各種迴歸成果的相關性，因此建議現場觀測數據需長期監控與調校，並輔以數值模式之模擬，方能使得石門水庫每一場颱風豪雨事件之排砂操作，達到鳶山堰穩定供水之目標。

謝　誌

本研究承蒙經濟部水利署北區水資源局補助經費，國立臺灣大學水工試驗所提供人力及電腦設備，使本研究得以順利進行，謹致謝忱。

參考文獻

1. BOSS company ”The Surface Water Modeling System,” http://www.aquaveo.com/.
2. Chien, N., and Wan, Z. (1999) “Mechanics of sediment transport,” ASCE, Reston, Va.
3. Fan, J. and Morris, G. L. (2009) “Reservoir sedimentation handbook” McGraw-Hill.
4. Guo, W. D., Lai, J. S. and Lin, G. F. (2008) “Finite-volume multi-stage schemes for shallow-water flow simulations,” Int. J. Numer. Meth. Fluids, 57, pp. 177-204.
5. Leveque, R. J. (1998) “Balancing source terms and flux gradients in high-resolution Godunov methods: The quasi-steady wave-propagation algorithm,” J. Comput. Phys., 146, pp. 346-365.
6. Petti, M. and Bosa, S. (2007) “Accurate shock-capturing finite volume method for advection-dominated flow and pollution transport,” Computers & Fluids, Vol. 36, pp. 455-466.
7. Sumi, T. and Kantoush, S. A. (2011) “Comprehensive Sediment Management Strategies in Japan: Sediment bypass tunnels,” 34th IAHR World Congress, pp. 1803-1810, Brisbane, Australia.
8. Sumi, T., Kobayshi, K., Yamaguchi, K. and Takata, Y. (2009) “Study on the applicability of the asset management for reservoir sediment management,” International Congress on Large Dams, Brasilia, Q.89-R.4.
9. Tan, Y. C., Lee, F. Z. and Lai, J. S. (2011) “Complex disaster damaged to water resources in Taiwan,” 21st International Congress on Irrigation

and Drainage, Question 56: Water and Land Productivity Challenges Sub-Topic 56.5: Irrigation and Drainage Management Improvements.
10. Toro, E. F., (2001) “Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Water Flows,” John Wiley & Sons, New York.
11. Zhou, J. G., Causon, D. M., Mingham, C. G. and Ingrams, D. M. (2001) “The surface gradient method for the treatment of source terms in the shallow water equations,” J. Comput. Phys., 168, pp. 1-25.
12. 經濟部水利署(2010)「98 年度水庫淤積潛勢評估」，逢甲大學。
13. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2008)「石門水庫水砂運移監測與異重流模式開發及應用研究」，國立交通大學。
14. 經濟部水利署北區水資源局(2007)「石門水庫既有設施防淤功能改善計畫」，巨廷公司。
15. 經濟部水利署北區水資源局(2008)「石門水庫高濁度缺水分析及改善策略檢討」，國立交通大學。
16. 經濟部水利署北區水資源局(2009)「石門水庫原水濁度異常緊急應變作業手冊」。
17. 經濟部水利署北區水資源局(2009)「石門水庫集水區原水濁度自動監測資訊網」，http://www.wranb.gov.tw/ntu/pahydro/index.html。
18. 經濟部水利署北區水資源局(2010)「石門水庫運轉規線下限及嚴重下限提升改善可行性評估及規劃」，臺灣大學水工試驗所。
19. 經濟部水利署南區水資源局(2008, 2009)「97~98 年度曾文水庫庫區泥砂濃度觀測系統建置暨量測研判分析計畫」，國立臺灣大學水工試驗所。
20. 經濟部水利署南區水資源局(2009)「曾文水庫水力排砂可行性規劃調查設計」，巨廷公司。
21. 經濟部水資源局(2003)「建立水庫高效率排砂(4/4)」，財團法人成大研究發展基金會。
22. 賴進松(2008)「霧社水庫水力排砂初步可行性研究」，臺灣大學水工試驗所研究報告第 789 號。

收稿日期：**民國** 101 **年** 3 **月** 13 **日**
修正日期：**民國** 101 **年** 3 **月** 30 **日**
接受日期：**民國** 101 **年** 4 **月** 9 **日**